Case Dynamica 2014

Pieter Van Damme   Wouter Van Gansbeke   Lennert Vanmunster
Ruben Verhulst

27 november 2014

1 Transformatiematrices

1.1 Van het $x'y'z'$-assenstelstel naar het xyz-assenstelsel

Het $x'y'z'$ assenstel wordt bekomen door het xyz-assenstelsel te roteren met een hoek α rond de x-as. De omgekeerde transformatie draait dus met een negatieve hoek α rond de x-as.

$$R^{x'y'z' \to xyz} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos(\alpha) \end{bmatrix}$$

1.2 Van het $x'''y'''z'''$-assenstelsel naar het $x''y''z''$-assenstelsel

Het $x'''y'''z'''$-assenstelsel wordt bekomen door het $x''y''z''$-assenstelsel te roteren met een hoek β rond de y''-as. De transformatiematrix draait dus met een negatieve hoek β rond de y'''-as.

$$R^{x'''y'''z''' \to x''y''z''} = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix}$$

Voor de omgekeerde transformatie wordt deze matrix geïnverteerd.

$$R^{x''y''z'' \to x'''y'''z'''} = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & -sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix}$$

1.3 Van het $x'''y'''z'''$-assenstelsel naar het xyz-assenstelsel

Om van het $x'''y'''z'''$-assenstelsel naar het xyz-assenstelsel te gaan, worden de vorige twee berekende transformatiematrices met alkaar vermenigvuldigd. Eerst worden de $x'''y'''z'''$-coördinaten getransformeerd naar het $x''y''z''$-assenstelsel. Vervolgens worden ze omgezet naar het xyz-assenstelsel.

$$\begin{aligned} R^{x'''y'''z''' \to xyz} &= R^{x'''y'''z''' \to x''y''z''} R^{x'y'z' \to xyz} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ \sin(\alpha)\sin(\beta) & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha)\cos(\beta) \\ -\cos(\alpha)\sin(\beta) & \sin(\alpha) & \cos(\alpha)\cos(\beta) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

2 Kinematica

2.1 Vraag 1

2.1.1 Ogenblikkelijke totale rotatiesnelheidsvector

Om de ogenblikkelijke totale rotatiesnelheidsvector $\overrightarrow{\omega}_w$ te bepalen worden de drie afzonderlijke rotatiesnelheidsvectoren uitgedrukt in het wereldassenstelsel en vervolgens opgeteld.

$$\overrightarrow{\omega_{tot}} = \overrightarrow{\omega_g} + \overrightarrow{\omega_i} + \overrightarrow{\omega_w}$$

Deze termen worden nu afzonderlijk bepaald.

$$\overrightarrow{\omega_g} = R^{x'y'z' \to xyz}\, \overrightarrow{\omega}'_g \quad = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\sin\alpha\,\omega_g \\ \cos(\alpha)\,\omega_g \end{bmatrix}$$

$$\overrightarrow{\omega_i} = R^{x'y'z' \to xyz}\, \overrightarrow{\omega_g}' \quad = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_i \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \cos\alpha\,\omega_i \\ \sin(\alpha)\,\omega_i \end{bmatrix}$$

$$\overrightarrow{\omega_w} = R^{x'''y'''z''' \to xyz}\, \overrightarrow{\omega_w}''' \quad = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ \sin(\alpha)\sin(\beta) & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha)\cos(\beta) \\ -\cos(\alpha)\sin(\beta) & \sin(\alpha) & \cos(\alpha)\cos(\beta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\omega_w \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos(\beta)\,\omega_w \\ -\sin(\alpha)\sin(\beta)\,\omega_w \\ \cos(\alpha)\sin(\beta)\,\omega_w \end{bmatrix}$$

De ogenblikkelijke rotatievector wordt dus weergegeven door door de volgende vergelijking.

$$\overrightarrow{\omega_{tot}} = \begin{bmatrix} -\cos(\beta)\,\omega_w \\ \cos(\alpha)\,\omega_i - \sin(\alpha)(\omega_g + \sin\beta\,\omega_w) \\ \sin(\alpha)\,\omega_i + \cos(\alpha)(\omega_g + \sin\beta\,\omega_w) \end{bmatrix}$$

2.1.2 Ogenblikkelijke totale rotatieversnellingsvector

De totale rotatieversnellingsvector is de afgeleide van de rotatiesnelheidsvector naar de tijd. Hierbij moeten er termen geïntroduceerd worden die de rotatie van de snelheidsvectoren weergeven.

$$\overrightarrow{\alpha_{tot}} = \frac{d\overrightarrow{\omega_{tot}}}{dt} = \overrightarrow{\alpha_g} + \overrightarrow{\alpha_w} + \overrightarrow{\alpha_i} + \overrightarrow{\omega_g} \times \overrightarrow{\omega_i} + \overrightarrow{\omega_g} \times \overrightarrow{\omega_w} + \overrightarrow{\omega_i} \times \overrightarrow{\omega_w}$$

Al deze termen worden nu afzonderlijk bepaald.

$$\overrightarrow{\alpha_g} = R^{x'y'z' \to xyz} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \alpha_g \end{bmatrix} \quad = \begin{bmatrix} 0 \\ -\sin(\alpha)\alpha_g \\ \cos(\alpha)\alpha_g \end{bmatrix}$$

$$\overrightarrow{\alpha_i} = R^{x'y'z' \to xyz} \begin{bmatrix} 0 \\ \alpha_i \\ 0 \end{bmatrix} \quad = \begin{bmatrix} 0 \\ \cos(\alpha)\alpha_i \\ \sin(\alpha)\alpha_i \end{bmatrix}$$

$$\overrightarrow{\alpha_w} = R^{x'''y'''z'''\to xyz}\begin{bmatrix}\alpha_w\\0\\0\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\cos(\beta)\alpha_w\\ \sin(\alpha)\sin(\beta)\alpha_w\\ -\cos(\alpha)\sin(\beta)\alpha_w\end{bmatrix}$$

$$\overrightarrow{\omega_g}\times\overrightarrow{\omega_i} = \begin{vmatrix}\overrightarrow{e_x} & \overrightarrow{e_y} & \overrightarrow{e_z}\\ \omega_{gx} & \omega_{gy} & \omega_{gz}\\ \omega_{ix} & \omega_{iy} & \omega_{iz}\end{vmatrix} = \begin{bmatrix}-\omega_i\omega_g\\0\\0\end{bmatrix}$$

$$\overrightarrow{\omega_g}\times\overrightarrow{\omega_w} = \begin{vmatrix}\overrightarrow{e_x} & \overrightarrow{e_y} & \overrightarrow{e_z}\\ \omega_{gx} & \omega_{gy} & \omega_{gz}\\ \omega_{wx} & \omega_{wy} & \omega_{wz}\end{vmatrix} = \begin{bmatrix}0\\ -\cos(\alpha)\cos(\beta)\omega_g\omega_w\\ -\sin(\alpha)\cos(\beta)\omega_g\omega_w\end{bmatrix}$$

$$\overrightarrow{\omega_i}\times\overrightarrow{\omega_w} = \begin{vmatrix}\overrightarrow{e_x} & \overrightarrow{e_y} & \overrightarrow{e_z}\\ \omega_{ix} & \omega_{iy} & \omega_{iz}\\ \omega_{wx} & \omega_{wy} & \omega_{wz}\end{vmatrix} = \begin{bmatrix}\sin(\beta)\omega_i\omega_w\\ -\sin(\alpha)\cos(\beta)\omega_i\omega_w\\ \cos(\beta)\cos(\beta)\omega_i\omega_w\end{bmatrix}$$

De totale ogenblikkelijke rotatieversnellingsvector wordt dus door de volgende formule gegeven.

$$\overrightarrow{\alpha_{tot}} = \frac{d\overrightarrow{\omega_{tot}}}{dt} = \begin{bmatrix}\cos(\beta)\alpha_w - \omega_g\omega_i + \sin(\beta)\omega_i\omega_w\\ -\sin(\alpha)\alpha_g + \cos(\alpha)\alpha_i + \sin(\alpha)\sin(\beta)\alpha_w - \cos(\alpha)\cos(\beta)\omega_g\omega_w - \sin(\alpha)\sin(\beta)\omega_i\omega_w\\ \cos(\alpha)\alpha_g + \sin(\alpha)\alpha_i - \cos(\alpha)\sin(\beta)\alpha_w - \sin(\alpha)\cos(\beta)\omega_g\omega_w + \cos(\alpha)\cos(\beta)\omega_i\omega_w\end{bmatrix}$$

2.2 Vraag 2

2.2.1 De ogenblikkelijke snelheid

De snelheid van C kan beschouwd worden als de som van de relatieve snelheid van het punt C in het $x'y'z'$-assenstelsel en de snelheid van dat assenstelsel. In dit assenstelsel kan de beweging van C beschouwd worden als een som van rotaties, nl. een rotatie rond het punt A door $\overrightarrow{\omega_g}$ en een rotatie rond het punt B door $\overrightarrow{\omega_i}$

$$\overrightarrow{v_C} = \overrightarrow{v_A} + \overrightarrow{\omega_g}\times(\overrightarrow{r_C}-\overrightarrow{r_A}) + \overrightarrow{\omega_i}\times(\overrightarrow{r_C}-\overrightarrow{r_B})$$

Deze termen worden afzonderlijk bepaald.

$$\overrightarrow{v_A} = R^{x'y'z'\to xyz}\begin{bmatrix}0\\v_v\\0\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0\\ v_v\cos(\alpha)\\ v_v\sin(\alpha)\end{bmatrix}$$

$$\overrightarrow{r_C}-\overrightarrow{r_A} = \begin{bmatrix}r_{CAx}\\r_{CAy}\\r_{CAz}\end{bmatrix} = R^{x'y'z'\to xyz}\begin{bmatrix}l_1 - l_3\sin(\beta) - l_4\cos(\beta)\\0\\ l_2 - l_3\cos(\beta) + l_4\sin(\beta)\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}l_1 - l_3\sin(\beta) - l_4\cos(\beta)\\ -\sin(\alpha)(l_2 - l_3\cos(\beta) + l_4\sin(\beta))\\ \cos(\alpha)(l_2 - l_3\cos(\beta) + l_4\sin(\beta))\end{bmatrix}$$

$$\overrightarrow{\omega_g} \times (\overrightarrow{r_C} - \overrightarrow{r_A}) = \begin{vmatrix} \overrightarrow{e_x} & \overrightarrow{e_y} & \overrightarrow{e_z} \\ \omega_{gx} & \omega_{gy} & \omega_{gz} \\ r_{CAx} & r_{CAy} & r_{CAz} \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\omega_g \cos(\alpha)(l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta) - l_1) \\ -\omega_g \sin(\alpha)(l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta) - l_1) \end{bmatrix}$$

$$\overrightarrow{r_C} - \overrightarrow{r_B} = \begin{bmatrix} r_{CBx} \\ r_{CBy} \\ r_{CBz} \end{bmatrix} = R^{x'y'z' \to xyz} \begin{bmatrix} -l_3 \sin(\beta) - l_4 \cos(\beta) \\ 0 \\ -l_3 \cos(\beta) + l_4 \sin(\beta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_3 \sin(\beta) - l_4 \cos(\beta) \\ -\sin(\alpha)(-l_3 \cos(\beta) + l_4 \sin(\beta)) \\ \cos(\alpha)(-l_3 \cos(\beta) + l_4 \sin(\beta)) \end{bmatrix}$$

$$\overrightarrow{\omega_i} \times (\overrightarrow{r_C} - \overrightarrow{r_B}) = \begin{vmatrix} \overrightarrow{e_x} & \overrightarrow{e_y} & \overrightarrow{e_z} \\ \omega_{ix} & \omega_{iy} & \omega_{iz} \\ r_{CBx} & r_{CBy} & r_{CBz} \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_i (-l_3 \cos(\beta) + l_4 \sin(\beta)) \\ -\omega_i \sin(\alpha)(l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta)) \\ \omega_i \cos(\alpha)(l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta)) \end{bmatrix}$$

De totale snelheid wordt dus gegeven door de volgende gelijkheid.

$$\overrightarrow{v_C} = \begin{bmatrix} \omega_i (-l_3 \cos(\beta) + l_4 \sin(\beta)) \\ \cos(\alpha) v_v - \omega_g \cos(\alpha)(l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta) - l_1) - \omega_i \sin(\alpha)(l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta)) \\ \sin(\alpha) v_v - \omega_g \sin(\alpha)(l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta) - l_1) + \omega_i \cos(\alpha)(l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta)) \end{bmatrix}$$

2.2.2 De ogenblikkelijke versnelling

De ogenblikkelijke versnelling is de afgeleide van de ogenblikkelijke snelheid. Hierbij moet er zeker rekening gehouden worden met het afzonderlijk afleiden van de leden van de kruisproducten.

$$\overrightarrow{a_C} = \frac{d\overrightarrow{v_c}}{dt} = \overrightarrow{a_A} + \frac{d\overrightarrow{\omega_g}}{dt} \times (\overrightarrow{r_C} - \overrightarrow{r_A}) + \overrightarrow{\omega_g} \times (\overrightarrow{v_C} - \overrightarrow{v_A}) + \frac{d\overrightarrow{\omega_i}}{dt} \times (\overrightarrow{r_c} - \overrightarrow{r_B}) + \overrightarrow{\omega_i} \times (\overrightarrow{v_C} - \overrightarrow{v_B})$$

Al deze termen worden opnieuw apart berekend.

$$\overrightarrow{a_A} = R^{x'y'z' \to xyz} \begin{bmatrix} 0 \\ a_v \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ a_v \cos(\alpha) \\ a_v \sin(\alpha) \end{bmatrix}$$

$$\frac{d\overrightarrow{\omega_g}}{dt} = \alpha_g = \begin{bmatrix} 0 \\ -\sin(\alpha)\alpha_g \\ \cos(\alpha)\alpha_g \end{bmatrix}$$

$$\frac{d\overrightarrow{\omega_g}}{dt} \times (\overrightarrow{r_C} - \overrightarrow{r_A}) = \begin{vmatrix} \overrightarrow{e_x} & \overrightarrow{e_y} & \overrightarrow{e_z} \\ \frac{d\overrightarrow{\omega_g}}{dt}_x & \frac{d\overrightarrow{\omega_g}}{dt}_y & \frac{d\overrightarrow{\omega_g}}{dt}_z \\ r_{CAx} & r_{CAy} & r_{CAz} \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \cos(\alpha)\alpha_g (-l_3 \sin(\beta) - l_4 \cos(\beta) + l_1) \\ \sin(\alpha)\alpha_g (-l_3 \sin(\beta) - l_4 \cos(\beta) + l_1) \end{bmatrix}$$

$$\overrightarrow{v_C} - \overrightarrow{v_A} = \begin{bmatrix} v_{CAx} \\ v_{CAy} \\ v_{CAz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_i (-l_3 \cos(\beta) + l_4 \sin(\beta)) \\ -\omega_g \cos(\alpha)(l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta) - l_1) - \omega_i \sin(\alpha)(l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta)) \\ -\omega_g \sin(\alpha)(l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta) - l_1) + \omega_i \cos(\alpha)(l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta)) \end{bmatrix}$$

$$\overrightarrow{\omega_g} \times (\overrightarrow{v_C} - \overrightarrow{v_A}) = \begin{vmatrix} \overrightarrow{e_x} & \overrightarrow{e_y} & \overrightarrow{e_z} \\ \omega_{gx} & \omega_{gy} & \omega_{gz} \\ v_{CAx} & v_{CAy} & v_{CAz} \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} {\omega_g}^2 \left(l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta) - l_1\right) \\ \omega_g \, \omega_i \cos(\alpha) \left(-l_3 \cos(\beta) + l_4 \sin(\beta)\right) \\ \omega_g \, \omega_i \sin(\alpha) \left(-l_3 \cos(\beta) + l_4 \sin(\beta)\right) \end{bmatrix}$$

$$\frac{d\overrightarrow{\omega_i}}{dt} = \overrightarrow{\alpha_i} + \overrightarrow{\omega_g} \times \overrightarrow{\omega_i} = \begin{bmatrix} -\omega_g \, \omega_i \\ \cos(\alpha) \, \alpha_i \\ \sin(\alpha) \, \alpha_i \end{bmatrix}$$

$$\frac{d\overrightarrow{\omega_i}}{dt} \times (\overrightarrow{r_c} - \overrightarrow{r_B}) = \begin{vmatrix} \overrightarrow{e_x} & \overrightarrow{e_y} & \overrightarrow{e_z} \\ \frac{d\overrightarrow{\omega_i}}{dt}_x & \frac{d\overrightarrow{\omega_i}}{dt}_y & \frac{d\overrightarrow{\omega_i}}{dt}_z \\ r_{CBx} & r_{CBy} & r_{CBz} \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_i \left(-l_3 \cos(\beta) + l_4 \sin(\beta)\right) \\ \sin(\beta) \cos(\alpha) \, l_4 \, \omega_g \, \omega_i - \cos(\beta) \cos(\alpha) \, l_3 \, \omega_g \, \omega_i \cdots \\ \cdots - \sin(\beta) \sin(\alpha) \, l_3 \, \alpha_i - \cos(\beta) \sin(\alpha) \, l_4 \, \alpha_i \\ \sin(\beta) \sin(\alpha) \, l_4 \, \omega_g \, \omega_i - \cos(\beta) \sin(\alpha) \, l_3 \, \omega_g \, \omega_i \cdots \\ \cdots + \sin(\beta) \cos(\alpha) \, l_3 \, \alpha_i + \cos(\beta) \cos(\alpha) \, l_4 \, \alpha_i \end{bmatrix}$$

$$\overrightarrow{v_B} = \overrightarrow{v_A} + \overrightarrow{\omega_g} \times (\overrightarrow{r_B} - \overrightarrow{r_A}) = \begin{bmatrix} -\sin(\alpha) \, \omega_g \, l_2 \\ \cos(\alpha) \, v_v - \cos(\alpha) \, \omega_g \, l_1 \\ \sin(\alpha) \, v_v - \sin(\alpha) \, \omega_g \, l_1 \end{bmatrix}$$

$$\overrightarrow{v_C} - \overrightarrow{v_B} = \begin{bmatrix} \omega_i \left(-l_3 \cos(\beta) + l_4 \sin(\beta)\right) + \sin(\alpha) \, \omega_g \, l_2 \\ -\omega_g \cos(\alpha) \left(l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta) - l_1\right) - \omega_i \sin(\alpha) \left(l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta)\right) + \cos(\alpha) \, \omega_g \, l_1 \\ -\omega_g \sin(\alpha) \left(l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta) - l_1\right) + \omega_i \cos(\alpha) \left(l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta)\right) + \sin(\alpha) \, \omega_g \, l_1 \end{bmatrix}$$

$$\overrightarrow{\omega_i} \times (\overrightarrow{v_C} - \overrightarrow{v_B}) = \begin{vmatrix} \overrightarrow{e_x} & \overrightarrow{e_y} & \overrightarrow{e_z} \\ \omega_{ix} & \omega_{iy} & \omega_{iz} \\ v_{CBx} & v_{CBy} & v_{CBz} \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} {\omega_i}^2 \left(l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta)\right) \\ -\omega_i \sin(\alpha) \left(\cos(\beta) \, l_3 \, \omega_i - \sin(\beta) \, l_4 \, \omega_i - \sin(\alpha) \, \omega_g \, l_2\right) \\ \omega_i \cos(\alpha) \left(\cos(\beta) \, l_3 \, \omega_i - \sin(\beta) \, l_4 \, \omega_i - \sin(\alpha) \, \omega_g \, l_2\right) \end{bmatrix}$$

Dit wordt nu allemaal opgeteld.

$$\overrightarrow{a_A} = \begin{bmatrix} {\omega_g}^2 \left(l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta) - l_1\right) + \alpha_i \left(-l_3 \cos(\beta) + l_4 \sin(\beta)\right) \cdots \\ \cdots + {\omega_i}^2 \left(l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta)\right) \\ a_v \cos(\alpha) + \cos(\alpha) \, \alpha_g \left(-l_3 \sin(\beta) - l_4 \cos(\beta) + l_1\right) + \omega_g \, \omega_i \cos(\alpha) \left(-l_3 \cos(\beta) + l_4 \sin(\beta)\right) \cdots \\ \cdots + \sin(\beta) \cos(\alpha) \, l_4 \, \omega_g \, \omega_i - \cos(\beta) \cos(\alpha) \, l_3 \, \omega_g \, \omega_i - \sin(\beta) \sin(\alpha) \, l_3 \, \alpha_i - \cos(\beta) \sin(\alpha) \, l_4 \, \alpha_i \cdots \\ \cdots - \omega_i \sin(\alpha) \left(\cos(\beta) \, l_3 \, \omega_i - \sin(\beta) \, l_4 \, \omega_i - \sin(\alpha) \, \omega_g \, l_2\right) \\ a_v \sin(\alpha) + \sin(\alpha) \, \alpha_g \left(-l_3 \sin(\beta) - l_4 \cos(\beta) + l_1\right) + \omega_g \, \omega_i \sin(\alpha) \left(-l_3 \cos(\beta) + l_4 \sin(\beta)\right) \cdots \\ \cdots + \sin(\beta) \sin(\alpha) \, l_4 \, \omega_g \, \omega_i - \cos(\beta) \sin(\alpha) \, l_3 \, \omega_g \, \omega_i + \sin(\beta) \cos(\alpha) \, l_3 \, \alpha_i + \cos(\beta) \cos(\alpha) \, l_4 \, \alpha_i \cdots \\ \cdots + \omega_i \cos(\alpha) \left(\cos(\beta) \, l_3 \, \omega_i - \sin(\beta) \, l_4 \, \omega_i - \sin(\alpha) \, \omega_g \, l_2\right) \end{bmatrix}$$

2.3 Vraag 3

2.4 Vraag 4

3 Dynamica

3.1 Vraag 1

3.2 Vraag 2

3.3 Vraag 3

3.4 Vraag 4

3.5 Vraag 5